科学読本

音とオーディオ(10)

平田能睦

9章：ハウリング防止とステレオ再生

なかなかうまくいかないハウリング防止とうまくいっているステレオ再生――どちらの信号処理も，むかしからいまに至るまで大きな変化はありません．この2つの信号処理をあらためて取り上げましょう．そのことから何を学べるでしょうか．1つはハウリング発生原理の単純さ，もう1つはステレオ再生技術の単純さです．

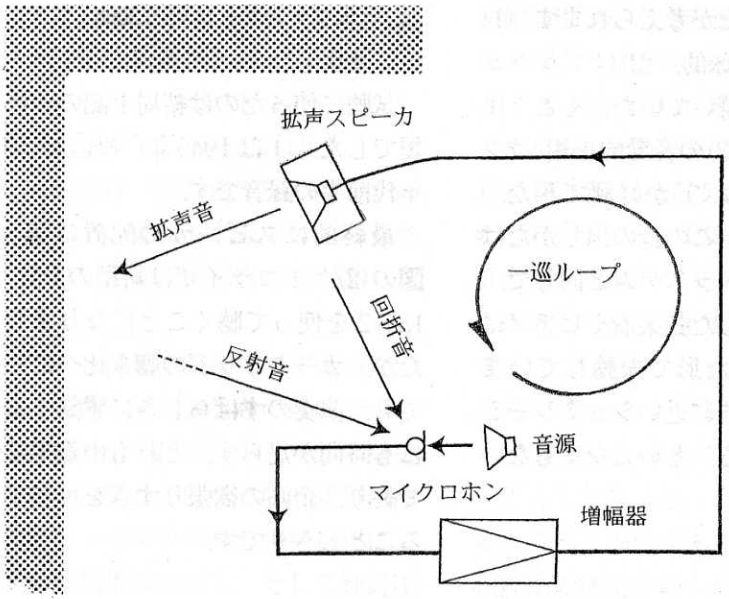
ハウリング防止

拡声を指すPA/Public Addressは公衆への演説という意味が含まれています．SR/Sound Reinforcementは音の増強ということです．

ではハウリングとは何でしょうか．辞書を引くと，ハウル（howl）は遠ぼえする（vi.），遠ぼえの声（n.）と出ています．ハウリング（howling）はほえる（a.），形容詞です．

日本語のハウリングは英語でhowlbackともいいますが，拡声システムでの音のフィードバック（帰還）によって生じる発振のことです．音響調整卓を操作しているミキサーにとって最もいやな音は，犬の遠ぼえではなく，スピーカから出てくるハウリングの音です．拡声にハウリングは付きものでやっかいなものですが，その発生原理は単純です．

小さな信号電圧を増幅して出力するアンプで，仮に入力端子と出力端子をコードで結合したらどうなるでしょうか．電源を入れたとたんにアンプは壊れます．



〈第9・1図〉ホールの拡声で生じる一巡ループ

では，そのアンプの入力端子にマイクを，出力端子にスピーカを接続した場合はどうでしょうか．マイクとスピーカをコードでつないでも何も起こりませんが，目に見えない音で結合すると音響装置が壊れる前に発生するのがハウリングです．

マイクに入った音が増幅されてスピーカから出て，それがふたたびマイクに入るというループが出来上がったときに，一巡するごとに増大する信号の最も増加の大きな周波数成分がハウリングの音となって聴こえ始めます．たとえばその周波数が500 Hzならプーン，1 kHzならピーンと聴こえてきます．マイクとスピーカの距離が短く，増幅量が大きい場合はハウリングが始まってから破壊レベルに達するまでの時間は一瞬です．

一巡ループの利得（ゲイン）が1より小さい場合は，ループを一巡するごとに信号は小さくなるので発振はしませんが，利得が1に近いほど信号が小さくなって消えるまでの時間は長くなるために，ハウリングが生じる前段階として，独特な音が聴こえることが少なくありません．そのときはマイクロホンに向って話している話者の語尾に，余韻のようにハウリング周波数の候補の音が付加されます．

こうした状態を実際に測定で調べ

器（送受話器）は，ハウリングが発生しないように増幅量は固定され，マイクロホンとスピーカの位置は決められていて，一体化されています．今日広く用いられている携帯電話機の場合も同じです．

外ではともかく，家の中で受話器を持たずにマイクロホンとスピーカを適当な場所に置いて，拡声通話で相手と話せないのでしょうか．

一巡ループの利得が1以上ではハウリングの発生になりますが，ホールでの拡声の一巡ループを1つの円で現わすと，拡声通話の一巡ループは8の字で表されます．ホールの拡声よりもループが少し複雑になったぶんだけ，拡声通話のハウリング防止の方法はいろいろ考えられますが，ここでは原理的に最も単純で安定した方法を1つだけ取り上げましょう．

太郎さんの家のマイクロホンに入射した音は，増幅されて花子さんの家のスピーカで拡声されてマイクロホンに入射すると，それがまた増幅されて太郎さんの家のスピーカで拡声され，ふたたびマイクロホンに入射します．こうして8の字の一巡ループが出来上がります．

そこで太郎さんの声がマイクロホンに入射しているときには，太郎さんの家の拡声スピーカの増幅器の利得を下げ，同様に，花子さんの声がマイクロホンに入射しているときは花子さんの家の拡声スピーカの増幅器の利得を下げます．

これは事実上通話路の片方を音声信号によって遮断するので，音声スイッチ法と呼ばれます．音声スイッチを用いる方法の欠点は会話の同時性が失われることです．通常，相手の話に合わせて「うん」とか「はい」とか相づちを打ちますが，これが伝わりません．「ちゃんと聞いているの？」と確かめたくなるかも知れません．

一方が拡声スピーカとマイクロホン，他方が受話器を使っている場合は，受話器でループは切れているのでハウリングは生じません．しかし，受話器側の人はエコーの多い部屋で話をしているようで，話しづらくなります．

ステレオ再生での響きの拡がり

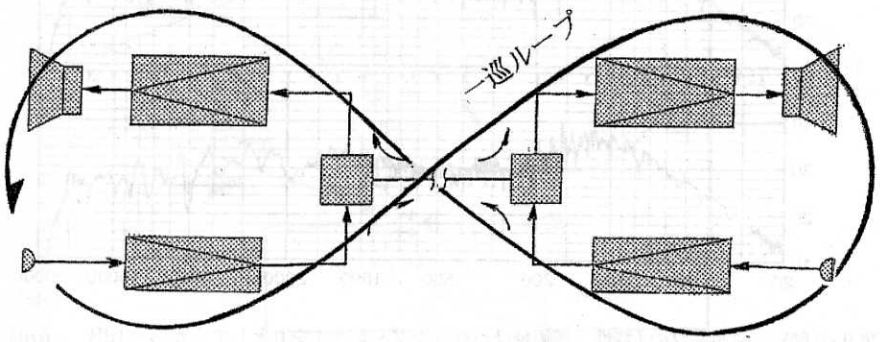
楽器は見えないのに，まるでそこにあるかのように左右のスピーカの間から音が出てきます．そしてコンサート・ホールの響きが左右のスピーカを越えて空間に拡がっているように聴こえます．ステレオ再生とモノーラル再生の違いは歴然としています．

ステレオ（stereo）は立体という意味ですが，少し冷静にステレオ再生音を聴くと，立体というには音の位置に奥行きが欠けています．また，響きの拡がりもコンサート・ホールで感じられる全方向性の拡がりとは少し違います．

聴感上の音の位置はレベル差で与えることができ，右を大きくすれば右に，左を大きくすれば左に，音の位置は移動します．しかし，音の位置を前後に動かすとなると，とたんに難しくなります．

左右のスピーカで空間の任意の点から音が出てくるように感じさせるためには，複雑な信号処理が必要になります．いろいろな方法が提案されましたが，聴取位置に対する制約が多くなることに加えて，録音技術に取り入れるには複雑で，レベル差録音のように簡単に利用できないなどの理由から，実用化されたものはありません．

では，響きについてはどうでしょ



〈第9・3図〉拡声通話系の一巡ループは8の字で表わされる

古代の拡声

耳と口はかなり近いところにあります．ごく小さな音を聴きとることができるのに大声を出しても耳は壊れません．もちろんハウリングを生じることはありません．昔，拡声装置のない時代に人がその役割を果たしていました．

アビシニア（エチオピアの旧名）ではカル・ハツ（王の言葉）と呼ばれる人が，目隠しのカーテンの背後で語る王の声を参列者に伝えていました．

さらに昔，紀元前1500年ころ，エジプトを出たイスラエルの大群衆に神から与えられた律法をモーセが話して聞かせた時は，拡声の役割を果たす人が大勢用いられたことと思われます．話者から遠方へ順次言葉を伝えて行く方法で，計算上は話に2倍の時間（休止に半分）をかければ，どれほど聴衆が多くても“拡声”することができます．昔もいまも，拡声に求められるのは忠実で明瞭なことです．

フクロウの耳

大きな丸い目で前方をじっと見つめているその顔つきは，いかにも賢そうです．実のところ，フクロウの目は眼窩の中に固定されていてきょろきょろできないのです．フクロウの視力は非常によく，日中はもちろんのこと，わずかな明かりがあれば夜間でも物をよく見ることができます．

しかし，真っ暗闇の中では耳が目の代りになります．方向を正確に探知する点で，メンフクロウの聴覚はどんな陸生動物の聴覚よりも優れています．ハート型の顔面にぎっしり生えた堅い羽毛と耳孔のまわりの耳介に相当する弁状組織は優れた集音器を成していますが，注目すべきところは左右非対称な耳です．

右耳の耳介と外耳道は少し下の位置にあって上向きに，左耳の耳介と外耳道は少し上の位置にあって下向きに付いています．この構造によって右耳に聴こえる音のほうが強ければ音源は上方，左耳に聴こえる音のほうが強ければ音源は下方にあることがわかります．音源の左右の方向だけでなく，上下の方向も正確に判断することができます．

首は非常に柔軟で，頭を270度回転できるものもいます．音源を突き止めようとするフクロウの反応はす早く，100分の1秒もたたないうちに顔を音源のほうへ向けます．しかし，目が回ることはありません．目が眼窩に固定されているので，自動的に目の照準は音源の方向に定められるからです．実に見事な設計です．

に，この距離を3mに拡げると，低音域では異常に拡がった感じになります．

マイクロホンの距離を変えると何が変化するのでしょうか．

相関係数は，2つの信号波形の類似の度合いを1から−1の値で表わすことのできる便利な係数です．2つの波形が同じなら相関係数は1，符号だけが異なる逆位相では−1，類似性がないなら0です．

前述の左右チャネルに録音された帯域雑音の相関係数を調べてみると，マイクロホンの間隔を30cmとした場合は125Hz帯域で0.92，250Hz帯域で0.70，500Hz帯域で0.13，1000Hz帯域で−0.12です．

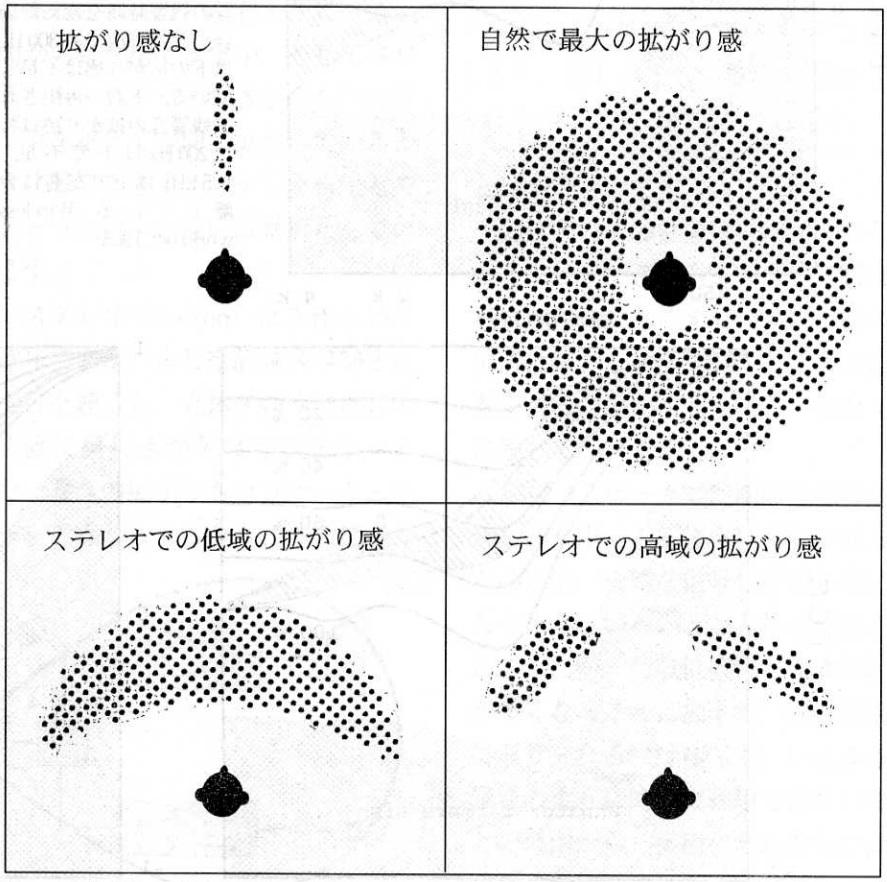
マイクロホンの間隔を10cmとすると，125Hz帯域では0.99，250Hz帯域では0.97，500Hz帯域では0.86，1000Hz帯域では0.52となります．

マイクロホンの間隔が3mでは125Hz以上のすべての帯域で0.1以下，相関係数はほぼ0です．

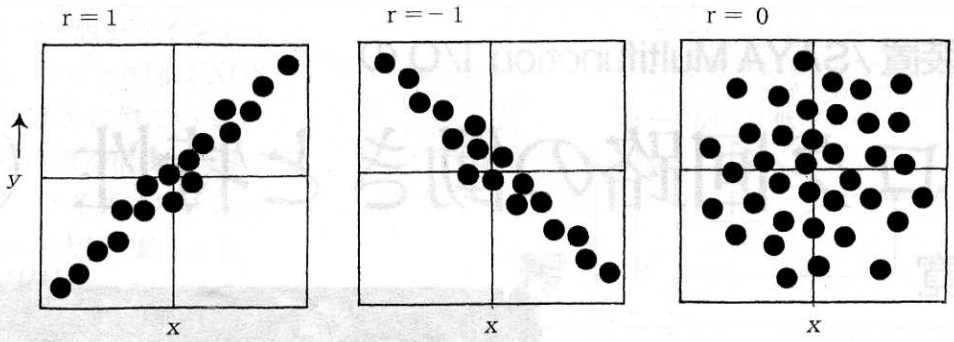
そこで，マイクロホンの間隔を音響的な両耳間距離30cmとしたときの相関係数を基準とし，これを自然で最大の音響的拡がり感（ASI100%）を与える両耳位置での相関係数とします．

コンサート・ホールでのステレオ収音において残響音は3m以上離した対のマイクロホンで録音されるので，左右チャネルの残響音成分の相関係数は0と考えてもよいでしょう．

ヘッドホンで聴くと異常に拡がった響きですが，リスニング・ルームで左右のスピーカから再生されると，どちらのチャネルの音も左右の耳に入るために，両耳位置での残響音の相関係数は周波数が低いほど1



〈第9・5図〉拡がり感のイメージ．上左：拡がり感なし，上右：最大の拡がり感，下左：低域の拡がり感，下右：高域の拡がり感



〈第9・6図〉
2つの値，xとyの関係を示す散布図と相関係数rの値

に近づき，拡がりが少ない響きになります．

ステレオ再生によるこのような拡がりの変化を相関係数で表わし，等拡がり感曲線と重ね合わせると，どのようなことがわかるでしょうか．

コンサート・ホールで得られる響きの拡がり感（ASI 100%）に比べると，ステレオ再生の響きの拡がり感は800 Hz以下の低音域で20%から40%不足しています．リスニング・ルームの残響時間を仮に1秒としても拡がり感はそれほど改善できません．高音域の拡がり感は相関係数がマイナスになることから，逆位相的もしくは分離した感じの拡がりになります．

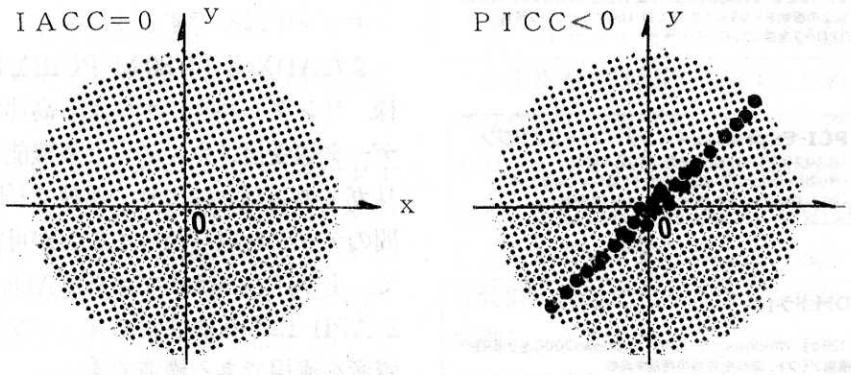
ステレオ再生で響きの拡がり感を改善するにはどうすればよいでしょうか．高音域の分離感を減らすために左右のスピーカの開き角度を狭めれば，低音域の拡がり感はさらに少なくなり，低音域の拡がり感を増すために開き角度を拡げれば，高音域の響きはさらに分離してしまいます．

スピーカとそれを駆動するアンプを増設するのも1つの方法ですが，簡単な信号処理によって低音域の拡がり感を補正することができます．

ASI 100%の曲線に近付けるには，800 Hz以下の相関係数を小さくすればよいので，左右チャネルの信号を加え合わせ，低域フィルタを通して得た低音成分を50 m/s秒程度遅延して，相関係数が－1の逆位相関係になる一対の低音成分を得て左右の信号に加え合わせ，これを左右チャネルの信号とします．

加え合わせる低音成分の大きさは片チャネルの低音成分に対してパワー比で0.3から0.5になりますが，好みにより調整することができるでしょう．この方法を使ってモノーラル信号を2つのスピーカで再生すると，聴きやすい自然な拡がりのある音が得られます．

遅延して加算する方法を使えば，低音の補強によって迫力が増し，高音の補強によってつやが出ます．この効果は再生音がリスニング・ルームによって変わる効果と似たところがあります．



〈第9・7図〉イメージで示したIACCとPICCの比較．直接音成分（y＝x）を強調したPICCを用いると，拡がり感を定量的に表わすことができる

9章のキー・ワード説明

●フィードバック（帰還）

マイクロホンに入射した音波xが拡声スピーカからA倍で拡声され，この拡声された音波yのB倍がマイクロホンに入射しているとすれば，ハウリングが発生しない状態，すなわち｜AB｜＜1なら，

$r = xy/\sqrt{XY}$

ここで$\overline{xy}$は信号xとyの積の平均値，XとYはそれぞれx^2とy^2の平均値を表わす．x＝yならr＝1となり，x＝－y（逆相）ならr＝－1となる．桶の売上が風と無関係であれば，その相関係数は0になる．

●両耳間相関係数（IACC）

両耳位置で測られた左右の音の物理的な相関係数．残響音場では間隔30 cmの2点間で測定した相関係数に近い値になる．

●知覚的両耳間相関係数（PICC）

聴感上の直接音の大きさは，後続する反射音で補強されるという聴感特性を考慮に入れて，D値を重みづけに用いて求める両耳間相関係数．直接音を無視できる残響音場では，PICCとIACCは等しい値になる．

■前号訂正：p.123の〈第8・5図〉の右図の波形が上下逆でした．お詫びのうえ，訂正させていただきます．（編）